

大亚湾浮游植物群落特征

孙翠慈¹, 王友绍^{1,*}, 孙 松², 张凤琴¹

(1. 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301; 2. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

摘要:于 2002 年冬、春、夏和秋季对大亚湾浮游植物进行采样调查, 分析了浮游植物的种类组成、丰度、优势种、多样性及群落结构的季节变化特征和平面分布特征。并讨论了浮游植物与营养盐、水温及环流等环境因子之间的关系。2002 年大亚湾浮游植物共鉴定出 48 属 114 种 (包括变型和变种), 丰度范围在 $5.79 \times 10^4 \sim 5.37 \times 10^6$ cells/m³ 之间, 平均值为 1.14×10^6 cells/m³。其中硅藻共 37 属 84 种, 其种数和细胞丰度都占绝对优势, 平均丰度为 1.08×10^6 cells/m³, 其次为甲藻, 9 属 23 种, 平均丰度为 9.91×10^4 cells/m³。此外还鉴定出蓝藻和金藻。大亚湾浮游植物丰度变化呈单一周期型, 春夏季高, 秋冬季节低。虽然硅藻的丰度占优势, 但秋季硅藻丰度降低 (占总丰度 75.8%) 使甲藻和蓝藻所占比例上升。研究得出春夏季大亚湾浮游植物主要以沿岸暖水性种类为主, 秋季和冬季除沿岸暖水种之外, 广布种和大洋种也较多, 尤其在冬季后者占优势。大亚湾浮游植物优势种类多, 不同季节既有交叉又有演替。与以往调查资料相比, 部分优势种发生变化, 优势程度顺序和细胞丰度发生了一定改变, 个体较大的细胞丰度优势逐渐增加。另外, 受季风、潮流、地理位置及人类活动影响, 大亚湾浮游植物丰度和群落结构有一定的季节和平面分布特征。大亚湾浮游植物的多样性在夏季偏低, 尤其在大亚湾核电站和大鹏澳养殖区附近表现明显。大亚湾浮游植物的丰度、种数、优势种演替及群落结构等其它群落特征与营养盐尤其是氮、磷和 N/P、水温、环流等环境因子密切相关。

关键词:浮游植物; 群落特征; 大亚湾

文章编号: 1000-0933(2006)12-3948-11 中图分类号: Q178.1 文献标识码: A

Analysis dynamics of phytoplankton community characteristics in Daya Bay

SUN Cui-Ci¹, WANG You-Shao^{1,*}, SUN Song², ZHANG Feng-Qin¹ (1. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 2. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(12): 3948 ~ 3958.

Abstract: Daya Bay is one of a series of large bays along the southern coast of China, characterized by low rates of water exchange with seawater. Daya Bay has been subjected to red tides, which have attributed to a deterioration of ecosystem over several decades. To assess its current status, phytoplankton composition, abundance, community structure and diversity were investigated in each season in 2002. Furthermore, the relationships were discussed between its characteristics and the variation of environmental factors, mainly nutrients, temperature influenced by anthropological activity and salinity. Results showed that a total of 48 genera and 114 species of phytoplankton were identified. The largest component was Bacillariophyta containing 84 taxa. Pyrrophyta was the next most common with 9 genera and 23 species. Cyanophyceae and Chrysophyta were also recorded within the study area. The cells abundance of phytoplankton varied from 5.79×10^4 to 5.37×10^6 cells/m³ with an average of 1.14×10^6

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向资助项目 (KSCX2-SW-132; KZCX3-SW-214); 广东省自然科学基金资助项目 (032622); 中国科学院南海海洋研究所知识创新工程前沿领域资助项目 (LYQY200303)

收稿日期: 2005-08-08; **修订日期:** 2006-03-10

作者简介: 孙翠慈 (1977~), 女, 河北石家庄人, 博士, 主要从事海洋生态学研究。E-mail: suncuici722@tom.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yswang@scsio.ac.cn

Foundation item: This work was financially supported by the project of knowledge innovation program of Chinese Academy of Sciences (No. KSCX2-SW-132, No. KZCX3-SW-214), the natural science of foundation of Guangdong (No. 032622) and the project of knowledge innovation program of South China Sea Institute of Oceanology (No. LYQY200303)

Received date: 2005-08-08; **Accepted date:** 2006-03-10

Biography: SUN Cui-Ci, Ph.D., mainly engaged in marine ecology.

cells/m³. Diatoms (the average of 1.08×10^6 cells/m³) were the predominant abundance recorded over the year. However, the percentage of diatoms (75.8%) in autumn was lower than other seasons. Dinoflagellates (the average of 9.91×10^4 cells/m³) were the secondly dominant group. Annual variations of the phytoplankton community in the Daya Bay show a typical one-peak cycle, with the highest cell abundance peak recorded in summer and the lowest recorded in autumn. The ecotypes of phytoplankton were mostly alongshore warmwater species, however, marine warmwater species and eurytopic species in winter and autumn are more abundant than the other seasons, especially in winter, which were dominant ecotypes. In Daya Bay the dominant species were diverse and variable with seasons. Compared with the data in the last two decades, some dominant species, the dominant sequence and cells abundance have changed. Moreover, the total species decrease, but big cells diatoms appearing mainly in winter and spring have increased since 1995, which has attributed toward a higher primary production over this time period. The species diversity index of phytoplankton in Daya Bay was low in summer, and the species diversity index especially around the nuclear power station and aquafarm was low in summer and autumn. Community structure and cells abundance were separated in relation to monsoon, current and anthropological activities. It is presented that the temperature and hydrodynamics in conjunction with the pattern of nutrients (DIN, DIP and the N/P) availability and depletion affect the phytoplankton composition, abundance, community structure, community succession and the diversity.

Key words: phytoplankton; phytoplankton community characteristic; Daya Bay

海洋浮游植物是海洋最重要的初级生产者,其种类组成、群落结构和丰度变动直接或间接的制约着海洋生产力的发展。在海洋生态系统中浮游植物能改变海洋碳通量^[1]、云返照率^[2]和海水光通量与热通量^[3],从而改变全球气候,影响人类的生存。此外,海洋浮游植物的群落结构可以灵敏而迅速地反映环境的变化,不同的浮游植物的群落结构决定了其在生态系统中的功能差异,因此海洋浮游植物群落变化与环境变化是当今海洋生态学研究热点之一。

20世纪80年代初期,徐恭昭等对大亚湾浮游植物状况曾作过调查^[4-6]。大亚湾地处亚热带海区,浮游植物呈现亚热带生物的共同特征。种类组成主要以暖水种类为主,其次是广温广布性种类。大亚湾浮游植物种类繁多,其中硅藻类占70%以上,其次是甲藻类^[7]。浮游植物数量周年变化呈单一周期型。近年来随着周边人口增加、沿岸经济的迅速发展,大亚湾生态环境发生了较大的变化^[7],由贫营养状态发展到中营养状态,局部出现富营养化趋势,在大亚湾澳头港附近水域多次发生赤潮。近些年对大亚湾浮游植物的研究仅限于局部海域或某个季节,均未涉及整个海域的浮游植物群落的季节性特征研究。

本文依据2002年大亚湾4个季度出海调查资料,对浮游植物的生态群落特征进行了较为详细的分析与讨论。

1 研究区域概况与研究方法

大亚湾位于珠江口东侧,地理位置介于113°29'42"~114°49'42"E,23°31'12"~24°50'00"N之间,被深圳大鹏半岛、惠阳南部沿海及惠东平海半岛三面环绕,西邻香港,南接广阔的南海。面积600km²,最大水深21m,平均为11m,是南海北部一个较大的半封闭性深水海湾。湾内岛屿众多。大亚湾余流为顺时针方向,且自湾口向湾内传播时潮流逐渐变小。水交换率较低,更新周期长。夏季粤东沿岸上升流带来高盐冷水使大亚湾夏季水层。环境因子季节性变化明显^[5]。

大亚湾浮游植物调查于2002年1月(冬),4月(春),8月(夏)和10月(秋)共进行4次,每次采集站位12个(图1)。浮游植物采用全国海岸带调查规定的浮游生物型网从底至表拖网^[8],样品立即用鲁格试剂固定保存(加入固定剂比例为2ml/dm³),浮游植物种类的鉴定和计数使用尼康Ys2-HF万用显微镜。

物种多样性指数和均匀度和优势度采用以下公式计算:

$$\text{香农-威纳指数 (Shannon-weaver) } (H) \text{ }^{[9]} \quad H = - \sum_{i=1}^s p_i \log p_i$$

$$\text{均匀度指数 } (J) \text{ }^{[10]} \quad J = \frac{H}{\log_2 s}$$

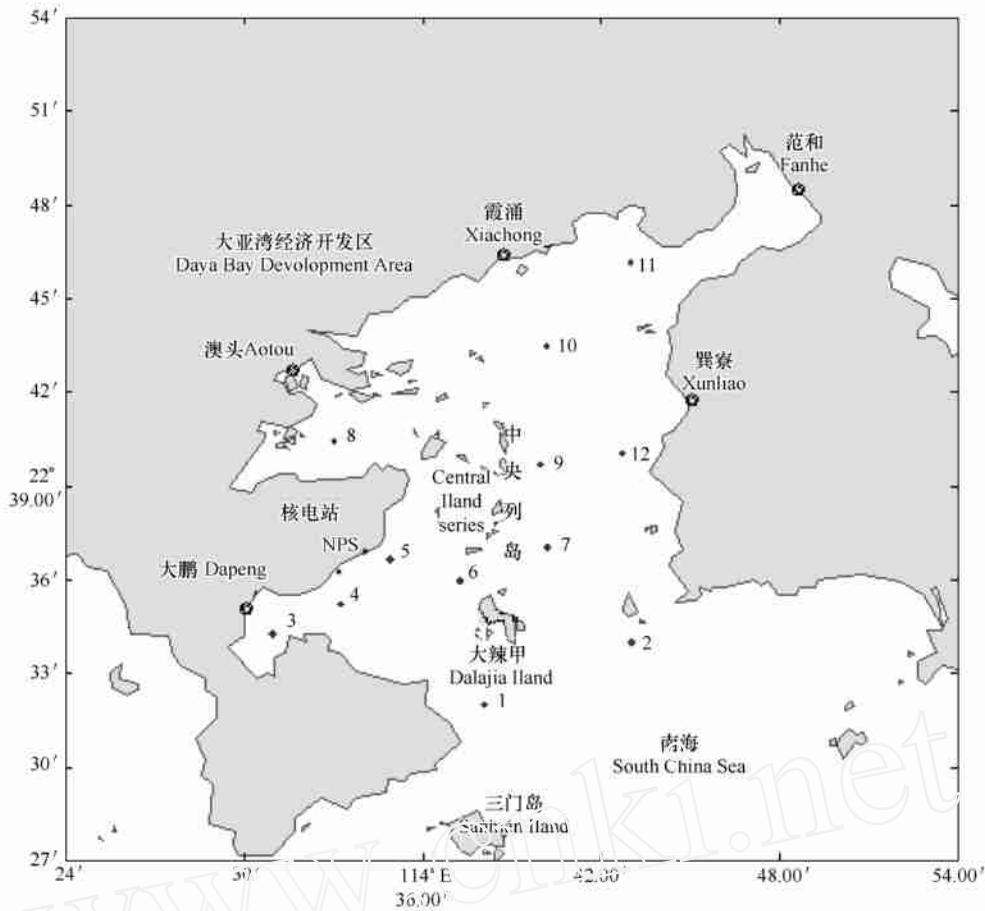


图1 大亚湾浮游植物调查站位图

Fig. 1 Sampling stations of phytoplankton of Daya Bay

$$\text{优势度值} (Y)^{[11]} \quad Y = (n_i/N) \times f_i$$

式中, N 为采集样品中所有物种的总个体数, S 为采集样品中的物种总数, P_i 为第 i 种的个体数与样品中的总个数的比值; n_i 为第 i 种的总个体数, f_i 为第 i 种在各站位出现的频率, Y 值大于 0.02 的种类为优势种。

3 结果

3.1 大亚湾浮游植物的种类组成

4 个航次共鉴定浮游植物 48 属 114 种(包括变型与变种), 包括硅藻、甲藻、蓝藻和金藻, 其中硅藻不论从细胞丰度还是种数来看都占绝对优势, 共 37 属 84 种, 占总种类的 73.7%, 其次为甲藻门, 9 属 23 种, 占 20.1% (表 1)。在硅藻中角毛藻属 (*Chaetoceros*) 种类最多共 15 种, 根管藻 (*Rhizosolenia*) 次之有 11 种, 甲藻门中的角藻 (*Ceratium*) 有 11 种。四季都出现的有 42 种, 硅藻为 34 种, 甲藻有 8 种。硅藻种数在夏季和秋季比较低, 甲藻在秋季种类最多 (表 1), 总体上季节间总的种数差异不明显。由于大亚湾为亚热带海湾, 浮游植物种类以沿岸暖水性种类为主, 其次是广温性种类和外海种, 沿岸暖水种尤其以春季和夏季居多。而外海种则主要出现在秋冬季节。具边圆筛藻 (*Coscinodiscus marginatus*) 和奇异棍形藻 (*Bacillaria paradoxa* Gmelin) 在大亚湾以前未见正式报道。

3.2 浮游植物丰度的季节变化和平面分布特征

2002 年大亚湾浮游植物的丰度范围在 $5.79 \times 10^4 \sim 5.37 \times 10^6 \text{ cells/m}^3$ 之间, 平均值为 $1.14 \times 10^6 \text{ cells/m}^3$ 。从图 2 可以看出, 硅藻全年丰度范围为 $3.61 \times 10^4 \sim 5.26 \times 10^6 \text{ cells/m}^3$, 平均为 $1.08 \times 10^6 \text{ cells/m}^3$ 。秋季硅藻丰

度最低,平均为 $2.82 \times 10^5 \text{ cells/m}^3$ 。夏季最高,平均为 $1.82 \times 10^6 \text{ cells/m}^3$ (图 3)。甲藻全年丰度范围为 $8.13 \times 10^3 \sim 1.73 \times 10^5 \text{ cells/m}^3$, 平均为 $9.91 \times 10^4 \text{ cells/m}^3$ 。甲藻在春季丰度最高,夏季丰度最低,分别为 $1.32 \times 10^5 \text{ cells/m}^3$ 和 $6.12 \times 10^4 \text{ cells/m}^3$ 。硅藻在丰度上占绝对优势,但秋季硅藻丰度较低,仅占总丰度的 75.8%,而其它季节达 90%以上;秋季甲藻丰度为 $1.06 \times 10^5 \text{ cells/m}^3$, 占总丰度比例有所增加,并且蓝藻门中铁氏束毛藻丰度增多,这可能与外海的入侵有关。

表 1 2002 年四季大亚湾浮游植物的种类组成

Table 1 Phytoplankton composition in 2002 in Daya Bay

种类 Specie	季节 Season			
	冬 Winter	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn
	属/种 Genera/specie (percent in total species, 占总种数 %)	属/种 Genera/specie (percent in total species, 占总种数 %)	属/种 Genera/specie (percent in total species, 占总种数 %)	属/种 Genera/specie (percent in total species, 占总种数 %)
硅藻 Bacillariophyta	32 属 60 种 (78.9 %)	30 属 60 种 (77.9 %)	28 属 53 种 (74.6 %)	29 属 52 种 (71.2 %)
甲藻 Pyrophyta	4 属 12 种 (15.8 %)	4 属 12 种 (15.6 %)	8 属 15 种 (21.1 %)	7 属 19 种 (26.0 %)
其它 The other	3 属 4 种 (5.3 %)	3 属 5 种 (6.5 %)	3 属 3 种 (4.3 %)	2 属 2 种 (2.7 %)
总计 Total	39/76	37/77	39/71	39/77

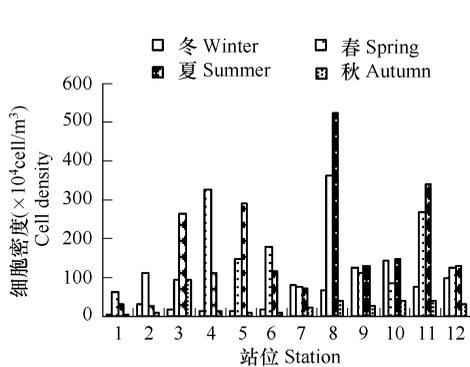


图 2 硅藻 4 个季度的丰度图

Fig. 2 Cell abundance of diatoms

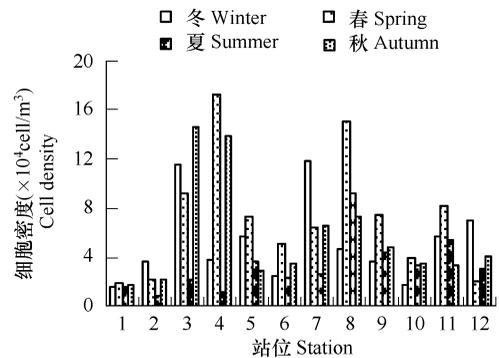


图 3 甲藻 4 个季度的丰度图

Fig. 3 Cell abundance of dinoflagellates

从图 4~图 7 可以看出,以大鹏湾(3 号站)、哑铃湾(8 号站)及范和港沿岸 3 个地区浮游植物密度较高,其中哑铃湾区浮游植物丰度最大,春季和夏季分别为 $3.78 \times 10^6 \text{ cells/m}^3$ 和 $5.37 \times 10^6 \text{ cells/m}^3$ 。从整体上看,除冬季外大亚湾浮游植物的细胞丰度分布呈现西高东低,且自小湾内向小湾外递减,而在整个大亚湾中又呈现近岸高于离岸的特征,这个特征尤其在春夏季明显。春夏季节雨量较大,西部沿岸工业和养殖业都比较发达,由径流输入的营养盐通量较高,所以西部浮游植物的丰度较高。秋季雨量减少,径流输入对浮游植物丰度影响减弱,因此浮游植物的密度仅在养殖区附近的 3 号、8 号和 11 号站较高。冬季 10 号站细胞丰度最高,丰度为 $1.45 \times 10^6 \text{ cells/m}^3$ 。冬季降雨最少,径流输入的影响作用非常小,水动力条件成为浮游植物丰度分布的重要影响因素,大亚湾海域冬季为顺时针方向环流^[4],因中央列岛对水流的缓冲作用使得中央列岛东北部的 9 号和 10 号站风浪微弱,这样有利于浮游植物自此密集。

3.3 优势种

调查期间大亚湾优势种类多,其中多为硅藻,不同季节既有交叉又有演替。

冬季优势种以广温广布种(如爱氏角毛藻(*Chaetoceros eibonii*)、伏氏海毛藻(*Thalassiothrix fraenfeldii*)和奇异棍形藻(*Bacillaria paradoxa* Gmelin))及外海暖水种(如距端根管藻(*Rhizosolenia calcaravis*)、笔尖根管藻(*Rhizosolenia styliformis*)和菱软几内亚藻(*Guinardia flaccida*))为主(表 2)。冬季大亚湾低温高盐,受外海水影响明显,因此适应这种条件的浮游植物占优势。虽然角毛藻数量占优势,但距端根管藻、菱软几内亚藻和夜光藻

(*Noctiluca scintillans*) 体积大,生物量高,所以对整个浮游植物的碳库影响较大。

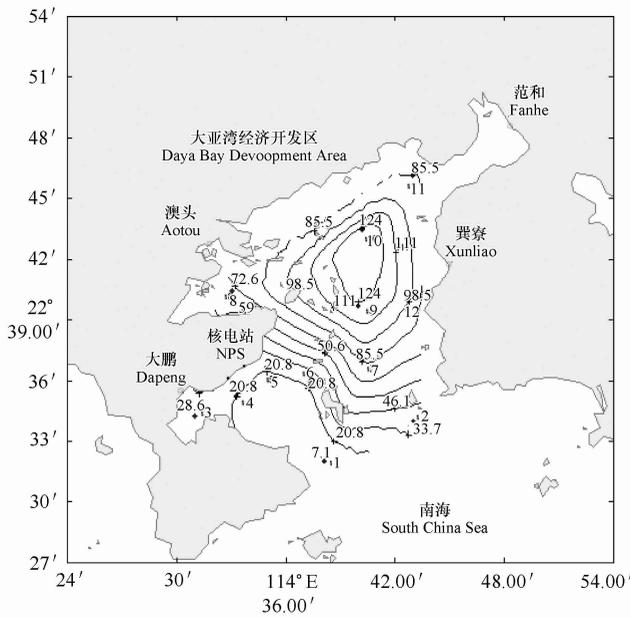


图4 大亚湾冬季浮游植物丰度 ($\times 10^4 \text{cell/m}^3$) 平面分布图
 Fig. 4 The distribution of cell abundance ($\times 10^4 \text{cell/m}^3$) in winter

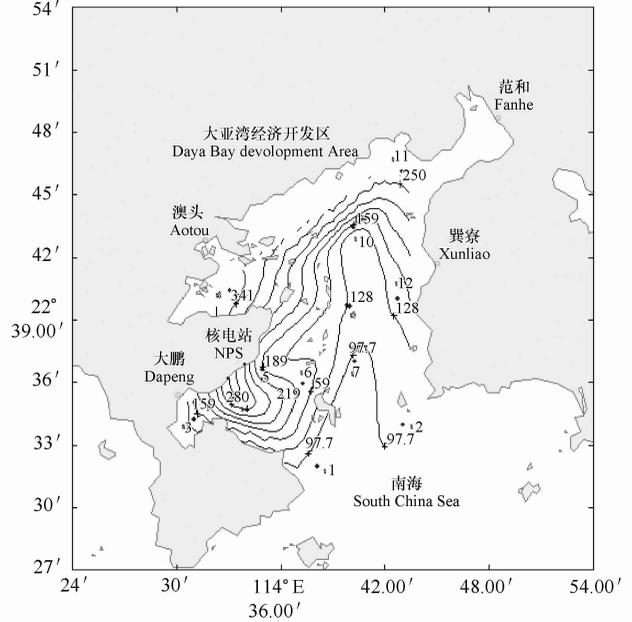


图5 大亚湾春季浮游植物丰度 ($\times 10^4 \text{cell/m}^3$) 平面分布图
 Fig. 5 The distribution of cell abundance ($\times 10^4 \text{cell/m}^3$) in spring

春季由于适宜的水温 (20.3 ~ 27 °C) 和雨季里入湾营养盐含量的增加使得某些近岸种如洛氏角毛藻 (*C. lorenzianus*)、窄细角毛藻 (*C. affinis*)、标志星杆藻 (*Asterionella notata*) 和尖刺拟菱形藻 (*Pseudonitzschia pungens*) 大量繁殖,成为春季优势种 (见表 2)。标志星杆藻是水体中度营养化的指示藻^[29],除在 4 号和 5 号站集中分布外,在 8 号和 10 号站数量也颇多,这表明大亚湾这几个区域处于中度偏高营养状态,水温、盐度和光照等条件适宜时有可能引发赤潮。

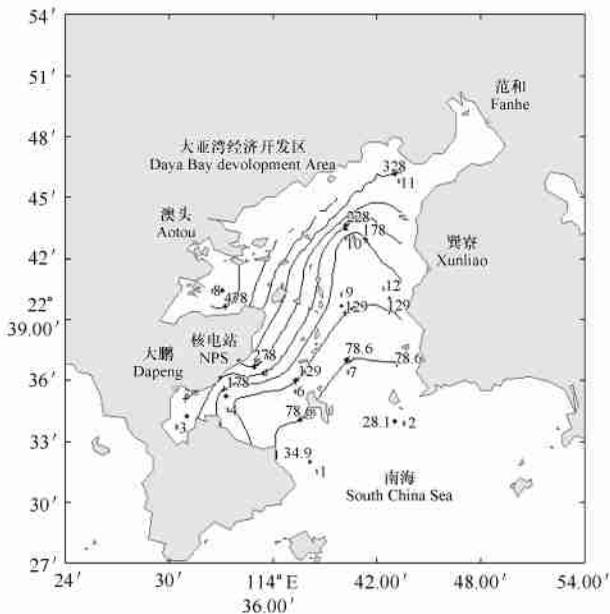


图6 大亚湾夏季浮游植物丰度 ($\times 10^4 \text{cell/m}^3$) 平面分布图
 Fig. 6 The distribution of cell abundance ($\times 10^4 \text{cell/m}^3$) in summer

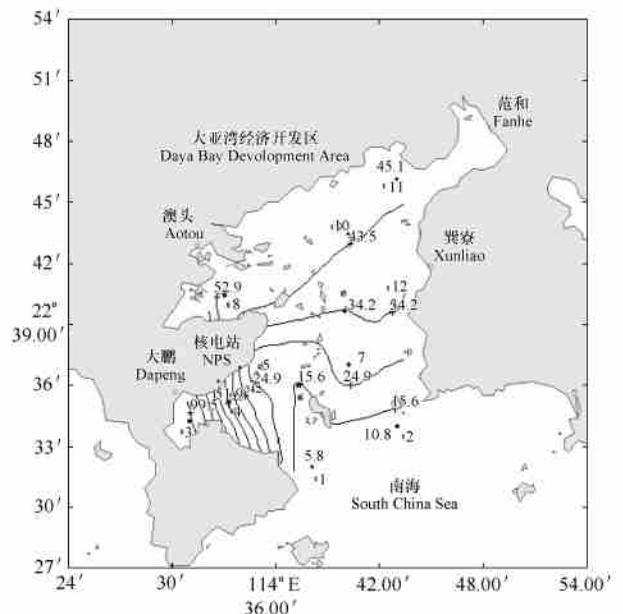


图7 大亚湾秋季浮游植物丰度 ($\times 10^4 \text{cell/m}^3$) 平面分布图
 Fig. 7 The distribution of cell abundance ($\times 10^4 \text{cell/m}^3$) in autumn

夏季近岸种柔弱拟菱形藻 (*Pseudonitzschia delicatissima*)、中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*) 和菱形海线藻 (*Thalassionema nitzschioides*) 等为优势种(表 2)。夏季水温最高(25~31.8),盐度(27.5~30.5)低于其它季节,因此浮游植物以耐高温和盐度适应能力较强的种类占优势。

秋季近岸种骨条藻和菱形海线藻仍是优势种(见表 2),但因营养盐在夏季被浮游植物的大量繁殖吸收未能得到及时补充,浮游植物的数量降低。大亚湾秋季是东北季风和西南季风的更替期,并时有台风,有利于南海海水向近岸推进,并且受粤东上升流的影响,一些外海种兼暖水种如笔尖根管藻、铁氏束毛藻 (*Trichodesmium thiebaultii*) 数量上升。

表 2 2002 年大亚湾浮游植物优势种

Table 2 Dominant species of phytoplankton in Daya Bay

季节 Season	优势种 Dominant species	平均丰度 Average abundance (cells/m ³)	占总细胞丰度百分比 Percent in total abundance (%)	优势度 Dominant Y
冬 Winter	爱氏角毛藻 <i>Chaetoceros eibonii</i>	1.11 ×10 ⁵	17.87	0.164
	距端根管藻 <i>Rhizosolenia calcaravis</i>	8.86 ×10 ⁴	14.31	0.131
	笔尖根管藻 <i>Rhizosolenia styliformis</i>	3.25 ×10 ⁴	5.24	0.052
	伏氏海毛藻 <i>Thalassiothrix fraenfeldii</i>	3.15 ×10 ⁴	5.09	0.051
	洛氏角毛藻 <i>Chaetoceros lorenzianus</i>	3.41 ×10 ⁴	5.51	0.051
	萎软几内亚藻 <i>Guinardia flaccida</i>	3.95 ×10 ⁴	6.39	0.032
	夜光藻 <i>Noctiluca scintillans</i>	1.86 ×10 ⁴	3.00	0.030
	奇异棍形藻 <i>Bacillaria paradoxa</i> Gmelin	3.49 ×10 ⁴	5.65	0.028
	洛氏角毛藻 <i>Chaetoceros lorenzianus</i>	3.26 ×10 ⁵	19.03	0.174
春 Spring	窄隙角毛藻 <i>Chaetoceros affinis</i>	2.48 ×10 ⁵	14.47	0.145
	标志星杆藻 <i>Asterionella notata</i>	2.29 ×10 ⁵	13.39	0.134
	尖刺拟菱形藻 <i>Pseudonitzschia pungens</i>	1.96 ×10 ⁵	11.43	0.114
	伏氏海毛藻 <i>Thalassiothrix fraenfeldii</i>	7.53 ×10 ⁴	4.40	0.044
	丹麦细柱藻 <i>Leptocylindrus danicus</i>	7.26 ×10 ⁴	4.24	0.042
	旋链角毛藻 <i>Chaetoceros curvisetus</i>	7.02 ×10 ⁴	4.10	0.020
夏 Summer	柔弱拟菱形藻 <i>Pseudonitzschia delicatissima</i>	4.82 ×10 ⁵	25.86	0.259
	中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	4.52 ×10 ⁵	24.23	0.242
	菱形海线藻 <i>Thalassionema nitzschioides</i>	4.34 ×10 ⁵	23.25	0.233
	尖刺拟菱形藻 <i>Pseudonitzschia pungens</i>	6.79 ×10 ⁴	3.64	0.036
	旋链角毛藻 <i>Chaetoceros curvisetus</i>	7.04 ×10 ⁴	3.77	0.028
	洛氏角毛藻 <i>Chaetoceros lorenzianus</i>	3.71 ×10 ⁴	1.99	0.017
	中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	7.47 ×10 ⁴	20.14	0.168
	菱形海线藻 <i>Thalassionema nitzschioides</i>	6.39 ×10 ⁴	17.23	0.172
秋 Autumn	铁氏束毛藻 <i>Trichodesmium thiebaultii</i>	3.04 ×10 ⁴	8.20	0.082
	叉形鳍藻 <i>Dinophysis miles</i>	2.52 ×10 ⁴	6.79	0.068
	尖刺拟菱形藻 <i>Pseudonitzschia pungens</i>	2.18 ×10 ⁴	5.89	0.049
	具尾鳍藻 <i>Dinophysis caudata</i>	1.59 ×10 ⁴	4.29	0.043
	笔尖根管藻 <i>Rhizosolenia styliformis</i>	1.45 ×10 ⁴	3.92	0.039
	柔弱拟菱形藻 <i>Pseudonitzschia delicatissima</i>	1.88 ×10 ⁴	5.07	0.038
	丹麦细柱藻 <i>Leptocylindrus danicus</i>	2.01 ×10 ⁴	5.43	0.027

3.4 群落结构和多样性指数及均匀度

3.4.1 群落结构 选取 12 个站位出现频率较高的 40 种浮游植物进行每个季节的聚类分析,指标间距离采用 Pearson 相关系数,系统聚类方法采用最短距离法。聚类分析在 spss11.0 统计软件中进行,结果见图 8。

从图 8 可以看出,冬季位于外海水入湾处的 1 号站与湾内其它站位相差较远,因受环流影响大,此处大部分为广温广布种,并且未见沿岸暖水种爱氏角毛藻的出现。该站细胞丰度也较低,为 7.11×10^4 cells/m³。大亚湾澳头和中央列岛东侧(7~10 号站位)的群落结构划分为一区,此区群落结构最复杂,细胞丰度大。在所有站位中 8 号站和 9 号站最相似,相似系数为 0.919。角毛藻、笔尖根管藻、萎软几内亚藻是这个区域的优势种,除爱氏角毛藻外,旋链角毛藻 (*C. tortissimus* Gran)、洛氏角毛藻和扁面角毛藻 (*C. compressus* Lauder) 细胞丰度也比较高。大亚湾西北部范和港沿岸(11 号)及湾东部沿岸(12 号)为一区,这个区域的优势种主要是距端根管

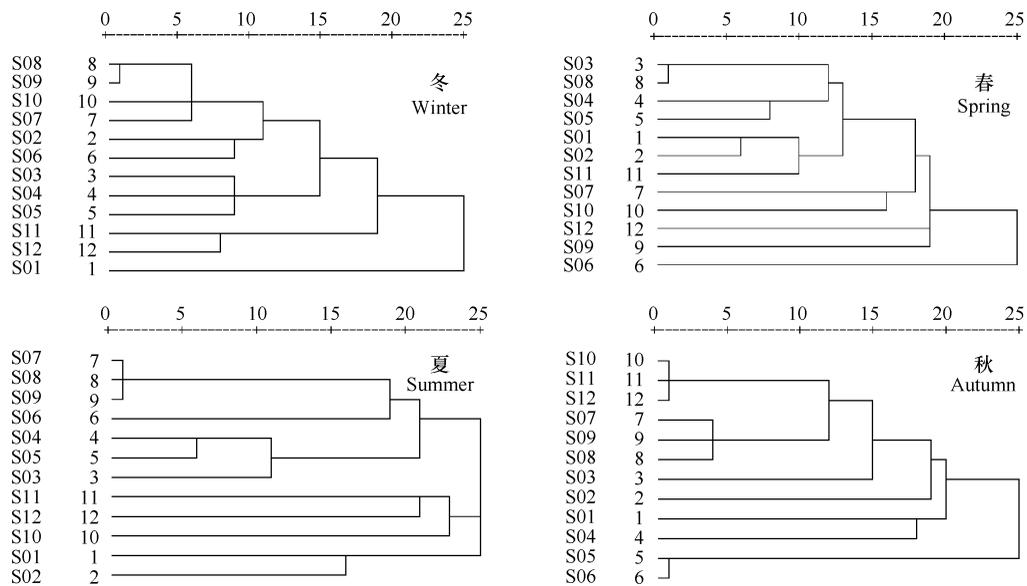


图 8 冬、春、夏、秋群落结构聚类图

Fig. 8 Dendrogram of phytoplankton in Daya Bay of winter, spring, summer, autumn

藻,其次是爱氏角毛藻。西部的大鹏澳和澳口核电站附近为一个区,该区优势种不明显,细胞丰度低于湾北部和东侧的细胞丰度。

春季的群落结构与冬季有所不同。春季大亚湾水温升高,雨量增加,陆源营养盐输入通量开始增强,使沿岸种的数量增加。3号站和8号站群落结构相似,以洛氏角毛藻、窄细角毛藻、尖刺拟菱形藻等沿岸种为优势种。这两个站位于养殖区附近,并且沿岸有现代化工业区,营养盐结构相似,所以群落结构比较接近。4号站和5号站位于大亚湾核电站附近,标志星杆藻在此处密集,细胞丰度为 8.46×10^5 cells/m³,其次是洛氏角毛藻和窄细角毛藻。位于湾口的1号和2号站相似,与冬季相比沿岸暖水种类的丰度和种类增加,这是由于陆源输入通量从春季开始增强所致。这两个站优势种为洛氏角毛藻和伏氏海毛藻。另外,离岸较远的7、9、10和6号站受陆源输入影响较小,群落结构差异比较大。

夏季大亚湾浮游植物群落分为3大群体,湾西部、湾东部及湾口(1号和2号站)。这3个区优势种次序有一定程度的差异。湾西部又分为以哑铃湾和核电站为中心的两个区。哑铃湾(8号站)及其附近的7和9号站浮游植物群落相似程度最高,优势种次序是中肋骨条藻、菱形海线藻及柔弱拟菱形藻。而位于大鹏澳和核电站附近的3号、4号及5号站优势种次序为柔弱拟菱形藻、中肋骨条藻、菱形海线藻。湾西部的10、11、12号站的最大优势种是菱形海线藻。夏季大亚湾营养盐呈湾顶向湾口递减趋势,因此湾口处浮游植物丰度最低,且优势种不明显。

秋季群落结构区域划分类似于夏季。位于大亚湾东部的10、11、12号站群落结构最相似,菱形海线藻在此区密集。湾西部的7、8、9号站主要优势种与夏季类似,但数量比夏季低,且甲藻和蓝藻的种类增加。另外,5号和6号站以鳍藻和铁氏束毛藻为优势种,这里位于湾西部靠近入湾口的位置,可能受外海水影响较大,不利于近岸种生长。

总之,大亚湾3个区域内群落结构相似,即澳头区(8和9号站)、核电站区(3、4号和5号站)及湾东部(11、12号站),每个区之间又有差异。可以看出区域的划分与受人类活动影响的较大区域分布大致相似,这说明人类活动对生态系统的影响不仅表现为浮游植物的数量分布特征,其群落结构也不例外。其中不一致的地方可能是由于浮游植物个体小,营漂浮生活,其群落结构在一定程度上受环流和风向影响所致。

3.4.2 多样性指数和均匀度 从图9,图10中可以看出,大亚湾浮游植物的多样性指数和均匀度都很高,符

合低纬度海域浮游植物多样性规律。夏季的多样性指数和均匀度都低于其它季节。夏季水温高,阳光照射强,不适宜浮游植物生长,同时雨量多使盐度变化大,因此夏季优势种多为耐高温耐盐度变化的种类,占细胞总丰度的 73.4%,优势明显,故 4 个季节中夏季的多样性指数低于其它季节。物种多样性是指群落中物种数目的多少,它是衡量群落规模和重要性的基础。一般来讲,种类越多或者各种个体数量分布越均匀,物种多样性指数越大。均匀度代表群落内物种分布的均匀程度,是群落是否成熟和稳定的特征之一。从图 9 中可以看出,位于养殖区的 3 号站夏季和秋季的多样性指数最低,该区位于大鹏澳,为一个半封闭的小海湾,平均水深只有 5m,有 3 条径流输入,与外界海域交换能力差,因此夏季降雨对大鹏澳内盐度和营养盐影响很大;这里水产养殖点密集,水域污染源还有工农业污水和生活污水;除此之外,附近核电站的温排水加大了夏季、秋季高温对浮游植物的抑制作用,受上述因素的综合影响,大鹏澳海域浮游植物的多样性和均匀度在夏季和秋季最低。冬季 12 号和 11 号站多样性偏低,是由于距端根管藻在此密集造成。

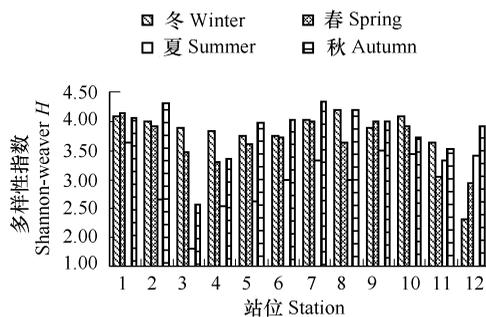
图 9 大亚湾浮游植物多样性指数 H

Fig. 9 The diversity index of phytoplankton in Daya Bay

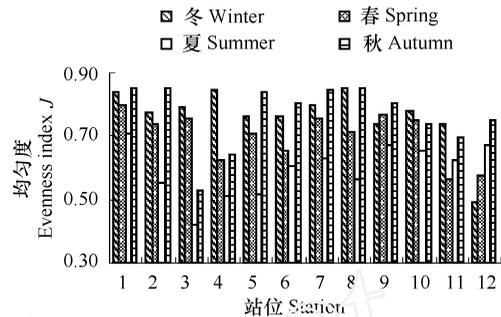
图 10 大亚湾浮游植物均匀度 J

Fig. 10 The evenness index of phytoplankton in Daya Bay

4 讨论

大亚湾浮游植物种类组成、丰度分布与人类活动的影响、营养盐、水温、盐度和环流等密切相关。关于大亚湾营养盐、水动力等环境要素已有不少学者作过研究^[12-16]。

4.1 大亚湾浮游植物的种类组成及丰度动态变化与营养盐的关系

浮游植物是海洋有机物的初级生产者,其生长繁殖需要从水体中吸取无机营养元素。因此,海域水体中营养盐浓度的高低是浮游植物生长繁殖的主要决定因子。而 N、P 元素是营养盐中关键元素,大约以 16:1 (Redfield 比值) 的原子数比例被浮游植物吸收^[17]。有研究表明,N/P 比值改变会使浮游植物群落结构改变,N/P 比值偏离 Redfield 比值越远,硅藻的数量和种类就会减少^[18]。近 20a 大亚湾浮游植物的种类变化非常大,进入 20 世纪 90 年代中期,大亚湾种类有所减少(表 3)。大亚湾沿岸的现代化工业和养殖业迅速发展,使大亚湾海域近 20a 的溶解无机氮(TIN)持续上升且幅度很大。1982~1983 年仅为 18 $\mu\text{g/L}$,而 1998~1999 年已高达 80 $\mu\text{g/L}$,氮的增加加速了磷酸盐的生物转化。虽然大亚湾海域春末到秋初(4~9 月份)集中了全年 80% 的降雨量,但是降雨后所形成的地表径流没有给大亚湾海域的磷酸盐带来太大的增殖^[15],大亚湾磷酸盐含量变化主要与外海水的入侵补给、有机质矿化及磷的再生有关^[19]。浮游植物大量消耗磷酸盐而未得到有效供给,导致磷酸盐与 TIN 相反,平均值逐年下降,大亚湾营养盐由原来的 N 限制转变成 P 限制。调查 1985~1986 年 N/P 值为 1.4,随后开始上升,到 1988~1989 年 N/P 值为 17.7,最接近 Redfield 比值,其中 N/P 对浮游植物的影响得到了很好的体现,在 1987 年和 1990~1991 年,浮游植物种类繁多,达 200 种以上。这几年很可能就是由 N 限制转变成 P 限制的转折点。1997 年至 1998 年我国海域受厄尔尼诺影响较大,南海许多海域爆发了几次大规模的赤潮,大亚湾虽未发生危害严重的赤潮,但浮游植物的数量高,甲藻数量也明显增加,而且硅藻、甲藻水华相继发生^[23],因此 1998 年种类较少。

根据近几年对大亚湾营养盐调查,大亚湾水域 TIN 浓度无论表层或底层均是春季最低,秋季最高,而磷酸

盐的浓度与 TN 相反,高值出现在春季,最低值出现在秋季。因此近些年来大亚湾的 N/P 在春季最低,最接近 Redfield 比值,有益于浮游植物生长,N/P 在秋季最高,1999 年竟高达 100 以上^[16],N/P 严重失衡不利于浮游植物的生长,尤其对硅藻影响明显^[16]。此次调查的大亚湾硅藻丰度变化与上述情况基本吻合,细胞丰度春夏季高,秋季最低,秋季其丰度占总丰度的 75.8%,明显低于其它季节。

表 3 大亚湾主要浮游植物属/种的年际比较

Table 3 Genera and species of phytoplankton and amount appeared investigation from 1983 to 2002

项目 Item		1983 ~ 1984	1985	1987	1990 ~ 1991	1995	1998	2002
硅藻 Bacillariophyta	属/种 Genera/specie	33/101	38/127	49/132	37/149	26/79	27/77	37/84
	种数占总种数的比 % Percent in total species	76.5	77.4	79.5	66.8	70	87.5	73.6
甲藻 Pyrrophyta	属/种 Genera/specie	6/27	8/30	11/28	18/63	12/32	4/8	9/23
	种数占总种数的比例 (%) Percent in total species	20.3	18.3	16.9	28.2	28.3	9.1	20.1
蓝藻 Cyanophyceae	属/种 Genera/specie	0	1/3	3/5	2.5	1/2	0	2/4
	种数占总种数的比例 (%) Percent in total species	0	1.9	3	2.2	1.8	0	3.4
总计 Total	属/种 Genera/specie	42/132	49/164	66/200	58/223	40/113	34/88	48/114

虽然大亚湾浮游植物种类减少,但代表生物量的叶绿素含量变化不大,有可能漏采一些个体小于网眼目数的藻类^[7],另外一个原因可能是近些年一些个体较大的外海种类如距端根管藻和萎软几内亚藻的数量增加,它们个体大,细胞内碳含量高,对浮游植物的碳库影响较大^[21]。因此大亚湾浮游植物个体大小可能存在一个向两极分化的趋势。大亚湾冬季浮游植物个体大的浮游植物优势增加,渤海湾的这种现象发生在秋季^[22]。群落中细胞大小变化影响到群落结构,从而改变浮游植物的生态功能。关于浮游植物细胞大小的观点较多,Malone 在“大洋稳态-近岸非稳态假说”认为,在稳态的大洋环境中大细胞浮游植物比小细胞浮游植物在沉降率、浮游动物捕食和种子的存储方面处于劣势,而在非稳定的近岸环境中则刚好相反^[23];大多数学者认为浮游植物粒级组分的这种变化与因半径的改变导致的营养盐吸收动力学半饱和常数变化有关,营养盐在细胞表层扩散限制层使得大细胞在低营养盐情况下失去竞争力,反之,高营养盐条件下小细胞浮游植物竞争处于劣势^[24,25]。大亚湾冬季水垂直混合最剧烈,底层大量营养被释放到上层,因此距端根管藻和萎软几内亚这些个体大的藻类占优势。在夏秋季大亚湾水分层导致底层营养运输被阻断^[4],大亚湾营养盐为 P 限制的情况下大细胞数量减少,而小细胞数量增加。

4.2 细胞丰度平面分布与环境因子之间的关系

大亚湾春、夏季浮游植物丰度高,秋冬季节低。降雨及陆源输入是导致该海区营养盐增加的一个重要因素,并影响该区的浮游植物分布^[26]。大亚湾春季和夏季雨水丰沛,且淡水输入冲淡海水盐度,一些近岸种得到迅速繁殖。而营养盐分布不平衡使大亚湾浮游植物丰度分布不均匀,并且明显受到人类活动影响,影响最大的区域有 3 个,即大鹏澳、范和港和澳头沿岸。大亚湾核电站和岭澳核电站及轻工业发达的大鹏镇位于大鹏澳的北岸,核电站温排水、工业废水及生活污水大量排入该区,另外大鹏澳周边分布有大量水产养殖场,再加上澳东部的网箱养鱼和竹筏养贝,使该区营养盐输入较多。大亚湾西北的澳头岸在 1992 年批准成立大亚湾国家经济开发区,以开发石油化工和汽车工业等大型工业为主,人口稠密,因此该区的工业废水和生活污水的排放量也很大,有大量营养盐输入。范和港水体较浅,水产养殖活跃。海水养殖和废水排放会引起水体富营养化,致使浮游植物或大型藻类的生物量增加^[27,28],大亚湾平面分布特征正是如此。因此大亚湾浮游植物的细胞丰富分布呈现自小湾向小湾外递减,而在整个大亚湾中又呈现近岸高于离岸的特征。这个分布特征与 Song 调查的大亚湾浮游植物生物量的分布大致相同^[29]。

4.3 大亚湾浮游植物优势种演替与环境因子之间的关系

浮游植物的种类组成及丰度变化取决于浮游植物的生态习性以及温度、盐度和营养盐等外界环境因素。与以往资料对比发现,部分优势种发生变化,优势程度顺序和细胞丰度发生了一定改变。

2002 年夏季的优势种类与 1983 年调查结果类似,但优势次序不同。以往角毛藻优势度在夏季最高,其中

扁面角毛藻和窄细角毛藻平均值都在 1×10^7 cells/m³, 其次是尖刺拟菱形藻和中肋骨条藻。而 2002 年夏季最主要优势种是柔弱菱形藻、中肋骨条藻及菱形海线藻。角毛藻是春季的优势种。角毛藻的生长最适温度为 30℃, 盐度为 28‰ 左右^[30], 当氮盐和 N/P 值偏高时, 角毛藻竞争优势劣于中肋骨条藻和柔弱拟菱形藻^[31]。大亚湾春季的氮盐和 N/P 总体水平低于夏季, N/P 比较接近 Redfield 比值^[29], 这可能使角毛藻数量高峰提前, 成为春季的优势种, 而耐温和盐度变化的柔弱菱形藻和中肋骨条藻则演替为夏季的优势种。在近 20a 来大亚湾生态环境发生了较大的变化。其中营养盐含量特别是总氮和总磷及 N/P 的变化最大, 而不同藻类对营养盐的需求不同^[30], 因此, 营养盐可能对浮游植物细胞丰度的变化及种类演替发挥着重要作用。

近 20a 来大亚湾冬、春季节的主要优势种变化较大。20 世纪 80 年代至 90 年代中期冬春季都是以适应低温高盐的翼根管藻 (*R. alata*) 及翼根管藻纤细变型 (*R. alata f. gracillima*) 为主要优势种, 其大量繁殖抑制了其它种类的浮游植物生长, 因此在 1985 年大亚湾春季硅藻种类只有 44 种^[4]。然而 1994 年春季优势种以缢缩角毛藻 (*C. constrictus*)、窄细角毛藻和细弱海链藻 (*Thalassiosira subtilis*) 等为主。1995 年后, 以前较少出现的外洋性暖水性种类菱软几内亚成为优势种, 且角藻属细胞数量有较大增加^[32]。而 2002 年冬季外海暖水种类和数量较多, 优势种为外海种距端根管藻、笔尖根管藻、伏氏海毛藻和沿岸暖水种爱氏角毛藻, 浮游植物种类增加, 物种多样性指数和均匀度偏高。2002 年春季主要为洛氏角毛藻、窄细角毛藻、标志星杆藻和尖刺拟菱形藻为主。近 40a 来南海海平面温度变化整体呈上升趋势, 尤其 20 世纪 90 年代后上升更为明显^[33], 同样大亚湾在 20 世纪 90 年代湾内表层水平均温度升高, 尤其核电站附近水域。相对而言, 温度的升高对促进大洋性种类生长的影响比其它生态类型大^[34]。因此温度升高有可能加速了大亚湾优势种演替过程。这也反映了生态系统对人类活动影响和全球气候变化的响应。

由于浮游植物生长周期短, 而且近海浮游植物的细胞丰度的变化及种类演替受到环境条件变化的影响很大, 因此今后对大亚湾浮游植物群落特征动态变化与环境因子之间的关系还需要作长期细致调查。

5 结论

(1) 2002 年大亚湾浮游植物已鉴定出 48 属 114 种 (包括变型和变种), 其中硅藻共 37 属 84 种, 其种数占绝对优势, 其次为甲藻, 9 属 23 种, 其余为蓝藻和金藻, 共 7 种。

(2) 2002 年大亚湾浮游植物丰度范围在 $5.79 \times 10^4 \sim 5.37 \times 10^6$ cells/m³, 平均值为 1.14×10^6 cells/m³。春夏季丰度高, 秋冬季节低, 呈单一周期型。硅藻的丰度占优势, 但秋季甲藻和蓝藻所占比例上升。

(3) 大亚湾浮游植物, 优势种类多, 不同季节既有交叉又有演替。与以往调查资料相比, 部分优势种发生变化, 优势程度顺序和细胞丰度发生了一定改变。温度和营养盐的变化可能加速了大亚湾优势种演替。在冬春季节, 一些个体大的外海种如距端根管藻和菱软几内亚藻的优势增加, 秋季甲藻和蓝藻优势度提高。

(4) 受季风、潮流、地理位置及人类活动影响, 大亚湾浮游植物丰度和群落结构平面有一定平面分布特征。

(5) 大亚湾浮游植物的多样性程度高, 但多样性指数在夏季偏低, 尤其在大亚湾核电站和大鹏澳养殖区附近表现明显, 表明这里浮游植物群落不稳定, 也反映了这里生态系统正在退化。

(6) 大亚湾浮游植物的种数、丰度、优势种演替及群落结构等其它群落特征与营养盐尤其是氮、磷和 N/P、水温、环流等环境因子密切相关。

References:

- [1] Sarmiento J L, Toggweiler J R, Najjar R. Ocean carbon-cycle dynamics and atmospheric pCO₂. *Phil Trans R Soc Lond A*, 1998, 325: 3~21.
- [2] Charlson R J, Lovelock J E, Andreae M O, et al. Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud zbedo and climate. *Nature*, 1987, 326: 655~661.
- [3] Sathyendranath S, Gouveia A D, Shetya S R, et al. Biological control of surface temperature in the Arabian Sea. *Nature*, 1991, 349: 54~56.
- [4] Xu G Z. Environments and resources of Daya Bay. Hefei: Hefei Science Press, 1987. 162~175
- [5] Third Institute of Oceanography State Oceanic Administration. Collection of papers on marine ecology in the Daya Bay. Beijing: Oceanpress, 1990. 27~34.
- [6] Zhou X P, Lin Y S, Wang Z D. A statistical analysis on phytoplankton community features in waters of Daya Bay. *J. Tropical Oceanology*, 1998, 17(3): 57~64.
- [7] Wang Y S, Wang Z D, Huang L M. Environment changes and trends in Daya Bay in recent 20 years. *J. Tropical Oceanology*, 2004, 23(5): 85~95.
- [8] State Bureau of Technical Supervise. The specification for oceanographic survey marine biological survey (GB12763.). Beijing: China Standard Press, 1991. 7~20
- [9] Shannon C E, WEAVER W. *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana IL: University of Illinois Press, 1949.

- [10] Pielou E C. An introduction to mathematical ecology. New York: Wiley-Interscience, 1969.
- [11] Sun J, Liu D Y, Xu J, et al. The netz-phytoplankton community of the Central Bohai Sea and its adjacent waters in spring 1999. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(9): 2003 ~ 2016.
- [12] Third Institute of Oceanography State Oceanic Administration. Collection of papers on marine ecology in the Daya Bay (). Beijing: Oceanpress, 1990.
- [13] Zheng A R, Shen H W, Liu J X, et al. The mechanism of low nutrients-high productivity in Daya Bay. *Marine Science*, 2001, 25: 48 ~ 52.
- [14] Qiu Y W. The characteristics of nutrients variation in the Daya Bay. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 23 (1): 86 ~ 93.
- [15] Peng Y H, Wang Z D, Sun L H, et al. Studies on nutrients of sea-surface micro-layer and hipo-layer at Daya Bay. *J. Oceanography in Taiwan Strait*, 2002, 21 (3): 310 ~ 316.
- [16] Peng Y H, Wang Z D, Chen H R, et al. Quality assessment of the neighboring sea waters before an the operation of the nuclear power station at Daya Bay. *Marine Science Bulletin*, 2002, 20(3): 45 ~ 52.
- [17] Redfield A C. The biological control of chemical factors in the environment. *Am Sci*, 1958, 46: 205 ~ 221.
- [18] Qu K M, Chen B J, Yuan Y X, et al. A prelliminary study on influence of N and P on population constituent of planktonic diatoms in seawater. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11 (3): 445 ~ 448.
- [19] Sun L H, Wang Z D, Peng Y H, et al. Various speciations of phosphorus in seawater of Daya Bay. *Marine Environmental Science*, 2002, 21(4): 19 ~ 23.
- [20] Xu N, Chen J F, Wang Z H, et al. Dynamic analysis on several algal bloom events in Da-ya Bay of Guangdong. *Marine Environmental Science*, 2001, 20 (2): 1 ~ 12.
- [21] Sun J, Liu D Y, Bai J, et al. Phytoplankton community of the Bohai Swa in winter 2001. *Periodical of Ocean University of China*, 2004, 34(3): 413 ~ 422.
- [22] Sun J, Liu D Y, Yang S M, et al. The preliminary study on phytoplankton community structure in the central Bohai Sea and Bohai Strait and its adjacent area. *Oceanology et Limnologia Sinica*, 2002, 33(5): 461 ~ 471.
- [23] Malone T C, Algal size. In: Morris ed. *The Physiological Ecology of Phytoplankton*. Berkeley and Los Angeles: University of California Press, 1980. 433 ~ 463.
- [24] Chisholm S W. Phytoplankton size. In: Falkowskip G, Woodhead A D. *Primary Productivity and Biogeochemical Cycles in the Sea*. Environmental Science Research, New York: Plenum Press, 1992, 43: 213 ~ 237.
- [25] Raven J A. Physiological consequences of extremely small size for autotrophic organism in the sea. Platt T, Li K W *Photosynthetic Pico plankton*. *Can Bull Fish Aquat Sci*, 1986, 214: 1 ~ 70.
- [26] Cai S Q, Wei G F, Wang Z D. An initial numerical study on the effect of input by outer source on the plankton in Dapeng 'Ao Cove, Daya Bay. *Ecologic Science*, 2004, 23(2): 101 ~ 105.
- [27] Bonsdorff E, Blomqvist E M, Mattila J, Norkko A. Coastal eutrophication: causes, consequences and perspectives in the archipelago areas of the northern Baltic Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1997, 44: 63 ~ 72.
- [28] Cancemi G, Falco G D, Pergent G. Effects of organic matter input from a fish farming facility on a *Posidonia oceanica* meadow. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, 56 (5/6), 961 ~ 968.
- [29] Song X Y, Huang L M, Huang X P, et al. Variation of phytoplankton biomass and primary production in Daya Bay during spring and summer. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, 49: 1036 ~ 1044.
- [30] Xu N, Chen J F, Wang Z H, et al. Study of relationships between algal bloom and nutrients. *Marine Environmental Science*, 2001, 21(4): 400 ~ 404.
- [31] Wei G F, Wang Z D, Lian J S. Succession of dominant phytoplankton species in spring 2002 at Dapeng 'Ao Cove, Daya Bay. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23 (11): 2285 ~ 2292.
- [32] Wang Z D, Lian J S, Hu J X, et al. Characteristics of degraded ecosystem in Daya Bay China. *Ecologic Science*, 2003, 22(4): 313 ~ 320.
- [33] Du Y D, Song L L, Mao H Q, et al. Climate warming in Guangdong province and its influences on agriculture and the adaption measures. *J. Tropical Meteorology*, 2004, 20(3): 302 ~ 310.
- [34] Tang D, Kester D R, Wang Z, et al. AVHRR satellite remote sensing and shipboard measurements of the thermal plume from the Daya Bay, nuclear power station, China. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84 (4): 506 ~ 515.

参考文献:

- [4] 徐恭昭. 大亚湾环境与资源. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1987. 162 ~ 175.
- [5] 国家海洋局第三海洋研究所. 大亚湾海洋生态文集(). 北京: 海洋出版社, 1990. 27 ~ 34.
- [6] 周贤沛, 林永水, 王肇鼎. 大亚湾水域浮游植物群落特征的统计分析. *热带海洋*, 1998, 17(3): 57 ~ 64.
- [7] 王友绍, 王肇鼎, 黄良民. 近 20 年来大亚湾生态环境的变化及其发展趋势. *热带海洋学报*, 2004, 23(5): 85 ~ 95.
- [8] 国家技术监督局. 海洋生物调查, 海洋调查规范 (GB12763). 北京: 中国标准出版社, 1991. 17 ~ 20.
- [11] 孙军, 刘东艳, 徐俊, 等. 199 年春季渤海中部及其邻近海域的网采浮游植物群落. *生态学报*, 2004, 24(9): 2003 ~ 2016.
- [12] 国家海洋局第三海洋研究所. 大亚湾海洋生态文集. 北京: 海洋出版社, 1989.
- [13] 郑爱荣, 沈海维, 刘景欣, 等. 大亚湾海域低营养盐维持高生产力的机制探讨. *海洋科学*, 2001, 25: 48 ~ 52.
- [14] 丘耀文. 大亚湾营养物质变异特征. *海洋学报*, 2001, 23(1): 85 ~ 93.
- [15] 彭云辉, 王肇鼎, 孙丽华, 等. 大亚湾微表层和次表层海水营养盐的研究. *台湾海峡*, 2002, 21(3): 310 ~ 316.
- [16] 彭云辉, 孙丽华, 陈浩如, 等. 大亚湾海区营养盐的变化及富营养化研究. *海洋通报*, 2002, 21(3): 44 ~ 49.
- [18] 曲克明, 陈碧娟, 袁有限, 等. 氮磷营养盐影响海水浮游硅藻种群组成的初步研究. *应用生态学报*, 2000, 11 (3): 45 ~ 48.
- [19] 孙丽华, 王肇鼎, 彭云辉. 大亚湾海域海水中各种形态磷的研究. *海洋环境科学*, 2002, 21(4): 19 ~ 23.
- [20] 徐宁, 陈菊芳, 王朝晖, 等. 广东大亚湾藻类水华的动力学分析. 藻类水华的消亡过程及其与环境因子的关系. *海洋环境科学*, 2001, 20(2): 1 ~ 6.
- [21] 孙军, 刘东艳, 高会旺, 等. 2001 年冬季渤海的浮游植物群落结构特征. *中国海洋大学学报*, 2004, 34(3): 413 ~ 422.
- [22] 孙军, 刘东艳, 杨世民, 等. 渤海中部和渤海海峡及邻近海域浮游植物群落结构的初步研究. *海洋与湖沼*, 2002, 33(5): 461 ~ 471.
- [26] 蔡树群, 韦桂峰, 王肇鼎. 外源输入对大亚湾大鹏澳浮游生物影响的模拟研究. *生态科学*, 2004, 23(2): 101 ~ 105.
- [29] 徐宁, 陈菊芳, 王朝晖, 等. 广东大亚湾藻类水华的动力学分析. 藻类水华的消亡过程及其与环境因子的关系. *海洋环境科学*, 2001, 21(4): 400 ~ 404.
- [31] 韦桂峰, 王肇鼎, 练健生. 大亚湾大鹏澳水域春季浮游植物优势种的演替. *生态学报*, 2003, 23(11): 2285 ~ 2292.
- [32] 王肇鼎, 练健生, 胡建兴, 等. 大亚湾生态环境的退化现状与特征. *生态科学*, 2003, 22(4): 313 ~ 320.
- [33] 杜尧东, 宋丽莉, 毛慧琴, 等. 广东地区的气候变暖及其对农业的影响与对策. *热点气象学报*, 2004, 20(3): 302 ~ 310.